

**Н.А. ТКАЧУК**, зав. каф. ТММиСАПР, докт. техн. наук, НТУ „ХПИ”,

**А.Я. МОВШОВИЧ**, докт. техн. наук, зам. директора НПП „Техоснастка”, г. Краматорск,

**А.Н. ТКАЧУК**, магистрант каф. ДПМ, НТУ „ХПИ”

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ХОЛОДНОЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ: К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ ЭЛЕМЕНТОВ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ШТАМПОВ**

Запропоновані методи і алгоритми для моделювання та дослідження елементів технологічних систем листової штамповки.

It is proposed methods and algorithms for the modelling and analysis of the stamping technological systems elements.

**Введение.** Как известно, для современного машиностроительного производства характерна тенденция интенсификации процессов проектирования, технологической подготовки производства и изготовления. Это приводит к необходимости интенсификации также и процессов исследования прочностных и жесткостных характеристик элементов технологических систем, используемых для изготовления продукции [1-5].

Листоштамповочное производство как на различных предприятиях, так и внутри отдельных, имеет смешанный характер – от единичного, опытного до серийного, крупносерийного и массового. В этой связи представляется весьма важным создание таких конструкций штампов, которые были бы эффективны при различной серийности выпускаемой продукции, т. к. существующие универсально-сборные штампы предназначены для единичного и опытного производства, а изготовление специальных стационарных штампов экономически оправдано лишь при крупносерийном и массовом характере производства. Создание конструкций, обеспечивающих эффективность их применения по стоимости и

металлоемкости, обладающих необходимой прочностью, жесткостью, стойкостью и позволяющих производить быструю переналадку при изменении номенклатуры штампуемых деталей, т.е. конструкций, соответствующих специфике гибкого производства и требованиям по надежности, невозможно без привлечения на стадии проектирования современных вычислительных средств и методов, лабораторных и производственных испытаний опытных образцов с использованием соответствующих приборов, измерительной техники и аппаратуры [2].

Условия универсальности, компактности, мобильности, прочности переналаживаемых штампов, а также требований снижения металлоемкости являются исходными при разработках новых конструкций и предполагают проведение необходимых теоретических и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) основных конструктивных элементов. Конструкции разделительных переналаживаемых штампов (РПШ) включают взаимосвязанные узлы кинематически сопряженных деталей, представляющих собой трехмерные тела, тела вращения, пластины различных форм и размеров, стержни и т.д. Соответственно для определения их напряженно-деформированного состояния необходимо решать пространственные, осесимметричные, плоские задачи теории упругости с учетом контактного взаимодействия рассматриваемых конструктивных элементов.

Однако известная сложность прочностных задач и необходимость определенных затрат времени для их решения вынуждают разработчиков сокращать расчетно-исследовательский этап, ограничиваясь ориентировочными, не учитывающими многих физических факторов эмпирическими зависимостями, или назначать важнейшие конструктивные параметры опытно-статистическим методом. Одной из главных причин такого подхода к решению задач конструирования является отсутствие в литературе научно-обоснованных методик и рекомендаций по определению основных конструктивных параметров штампов для листовой штамповки. Анализ

опубликованных работ показывает, что существующие методы расчета основных элементов конструкций разделительных штампов не учитывают характера НДС, формируемого реальными схемами нагружения, опирания и закрепления. В связи с этим представляется весьма актуальным решение рассматриваемой проблемы на современном научно-техническом уровне с привлечением наиболее эффективных теоретических и экспериментальных методов [2].

Одной из наиболее важных компонент такой масштабной проблемы является задача расчетно-экспериментального обоснования расчетных схем наиболее нагруженных элементов разделительных штампов, в частности, переналаживаемых, что и составляет цель данной работы.

**Моделирование элементов штампов.** Технологические системы листовой штамповки представляют собой замкнутые цепочки взаимосвязанных, взаимодействующих и взаимовлияющих элементов. Технологические системы операций листовой штамповки включают: прессы, штампы (включая формообразующие и режущие части) и заготовку (штампуемый материал). На рис.1 представлены примеры моделей штампов, полученные в САПР-Ш (САПР штампов) разработки Харьковского НИИ технологии машиностроения. Наибольший интерес в качестве объекта исследований с точки зрения обеспечения прочности, жесткости, долговечности представляют режущие элементы штампов (пуансоны, матрицы, пуансон-матрицы), плиты штампов (верхняя, нижняя), съемники и колонки. Данные элементы представляют собой сложные конструкции, в состав которых входят тела вращения, пластины, стержневые конструкции и массивные тела.

**Технологическая нагрузка,** возникающая при разделении листового материала, прикладывается непосредственно к заготовке и режущим частям штампов, а уже через них – к элементам пакетов, блоков, на ползун и подштамповую плиту пресса. В связи с этим наибольший интерес представляет собой вопрос распределения усилий штамповки в сопряжении пуансонов, матриц и пуансон-матриц со штампуемым

материалом, что в свою очередь приводит к необходимости рассмотрения собственно технологической операции вырубки-пробивки.

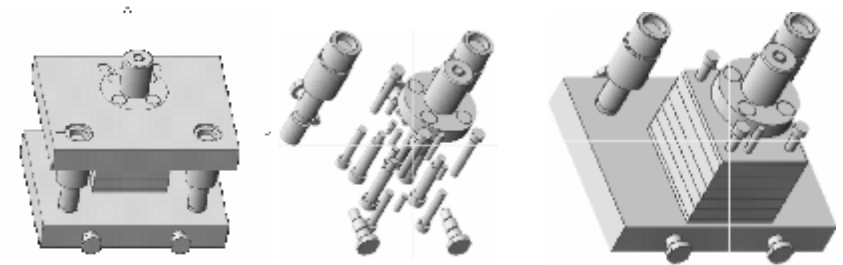


Рис.1. Модель штампа в графическом редакторе САПР

Разделительные операции, т.е. получение деталей из листового материала путем отделения одной части заготовки от другой, в зависимости от применяемого инструмента и назначения продукции, подразделяются на следующие виды: вырубка, пробивка, разрезка, отрезка, надрезка, обрезка, зачистка, просечка и др. Для РПШ наиболее характерными являются операции вырубки и пробивки. Однако, несмотря на конструктивные различия оснастки и режущего инструмента, назначение продукта резки и многообразие технологических требований, разделительные операции листовых материалов имеют общие закономерности процесса разделения. В связи с этим анализ механики разделительных операций имеет большое значение как для повышения эффективности процесса резки путем уменьшения требуемых усилий, повышения качества штампуемых деталей и улучшения использования прессового оборудования, так и для определения основных параметров процесса – действующих усилий разделения, контактных давлений на режущий инструмент, сопутствующих сил трения и др. [2].

В настоящее время в технической литературе опубликован ряд статей, освещающих методики и результаты теоретических, экспериментальных исследований закономерностей разделительных операций листовой штамповки [1-5]. Однако

теоретических обобщений по выполненным работам не имеется, что определяет необходимость дополнительных исследований для получения конкретных характеристик и компонентов процесса разделения листового материала в переналаживаемых штампах.

В представлении различных авторов процесс резки-вырубки протекает в две, три и даже четыре стадии: упругая стадия, упруго-пластическая, пластическая и стадия разрушения. В зоне разделения, как отмечается в диссертации [2], наблюдается сложное напряженно-деформированное состояние штампуемого материала. При анализе механики разделительных операций в переналаживаемых штампах практический интерес представляют такие характеристики, как глубина внедрения режущего инструмента в металл до момента скола, зона контакта листового материала с пуансонами, матрицами, пуансон-матрицами, распределение контактных давлений в этих зонах, т.е. данные, позволяющие сформулировать краевые условия при постановке задач о НДС инструмента.

В опубликованных работах, как теоретических, так и экспериментальных, рассмотрены различные аспекты процессов разделительных операции листового материала. В частности, значительное количество исследований посвящено анализу НДС в зоне разделения [6, 7], в которых даются противоречивые оценки – от плоской до трехмерной интерпретации рассматриваемого процесса.

Что касается данных, являющихся исходными для определения краевых условий в прочностных задачах о режущем инструменте, то следует отметить лишь небольшое число работ, в некоторой мере отражающих данные вопросы [8, 9]. Однако для формулировки краевых условий при решении задач о напряженно-деформированном состоянии пуансонов, матриц, пуансон-матриц переналаживаемых штампов необходимы дополнительные исследования.

Расчеты на прочность рабочего инструмента разделительных штампов обладают специфической особенностью в связи с весьма большим многообразием конструкций, форм, размеров матриц,

пуансон-матриц, пуансонов в соответствии с бесчисленным множеством разновидностей штампуемых листовых деталей, классифицируемых по различным технологическим и реологическим характеристикам. Поэтому в опубликованных работах по теоретическим исследованиям НДС рабочего инструмента отражены либо общие подходы к решению некоторых задач теории упругости, либо рассмотрены отдельные частные случаи для конкретных конструкций. Однако, ни то, ни другое не позволяет выработать общую методику прочностных расчетов пуансонов, матриц, пуансон-матриц для РПШ.

Характерной тенденцией состояния рассматриваемой проблемы в настоящее время является увеличение количества исследований по методу конечных элементов (МКЭ) как в области конструирования технологической оснастки и кузнечно-прессового оборудования вообще [10-14], так и по инженерным расчетам вырубных матриц, пуансон-матриц и пуансонов.

Среди публикаций по экспериментальным исследованиям НДС рабочего инструмента для разделительных операций, а также его работоспособности, стойкости и долговечности, основное внимание уделяется выяснению влияния технологических, конструктивных и эксплуатационных параметров на перечисленные прочностные и стойкостные характеристики. При рассмотрении нагрузок, действующих на режущий инструмент в процессе штамповки [14-16] указывается на наличие как основных усилий вырубки-пробивки, так и сопутствующих распирающих усилий, сил проталкивания и сил трения. Однако приводимые величины и методики их определения различны. Влияние технологических факторов [17-19], марки материала и термообработки [20-21], применения твердых сплавов [13], а также различных эксплуатационных режимов [22] представлено в литературе в виде отдельных частных случаев, не позволяющих распространить представленные методики и результаты для определения краевых условий и расчетов рабочего инструмента РПШ. Некоторые общие подходы и методы [23], а также результаты экспериментальных исследований, выполненных

современными высокоэффективными методами (голографическая спекл-интерферометрия, объемная фотоупругость, динамическая тензометрия), также не дают полного ответа на поставленные вопросы по идентификации нагружений пуансонов, матриц и пуансон-матриц [24-26].

Таким образом, как отмечается в [2], анализ процессов взаимодействия штампуемого материала с рабочим инструментом, механики деформирования листовых заготовок, кинематики и последовательности передачи внешних: воздействий и реактивных усилий в элементах разделительных штампов различных конструкций показывает, что исходным звеном в данной замкнутой системе трансформации нагрузок является процесс вырубки-пробивки, определяющий, прежде всего, величину основного технологического усилия и граничные условия для пуансонов, матриц, пуансон-матриц, и далее в зависимости от конструкции формирует расчетные схемы базовых, направляющих и других элементов штампа. В диссертации Е.И. Заярненко [2] на основе расчетно-экспериментальной методики систематизированы многие результаты исследований распределения контактных зон, контактных давлений и напряженно-деформированного состояния в системе взаимодействующих тел. Однако в этой работе не были проведены системные исследования процесса взаимодействия инструмента с заготовкой на всех стадиях штамповки. Это стало возможным в последнее время с развитием численных методов моделирования сложных нелинейных физико-механических процессов и вычислительных возможностей компьютерных комплексов. Однако описанные в работе [2] результаты могут послужить в качестве начального приближения при задании граничных условий для задач „раздельного” исследования НДС режущих элементов штампов.

**Формулировка задачи исследования напряженно-деформированного состояния элементов разделительных штампов.** Для создания новых конструкций переналаживаемых штампов [2] в качестве исходных данных используются геометрические, технологические, реологические параметры изготавливаемых деталей, технические характеристики

оборудования, серийность производства и условия эксплуатации создаваемой штамповой оснастки. База этих данных позволяет конструктору разработать принципиальную схему или даже общий вид необходимого штампа. Далее, еще до стадии чертежной детализации или формирования модели в САПР, проводится конструкторско-исследовательская проработка основных элементов конструкции с целью определения наиболее рациональных форм и размеров, обеспечивающих одновременно соблюдение технологических, экономических, эргономических, эксплуатационных условий, а также условий прочности, жесткости и долговечности при минимальной металлоемкости. Выполнение всех указанных условий в свою очередь требует разработки и применения адекватных математических моделей и методов расчета конструируемых элементов штампов [2].

В общем случае математическая модель силового взаимодействия некоторого элемента конструкции штампа с другими сопряженными элементами, учитывая НДС рассматриваемого элемента, содержит системы разрешающих дифференциальных уравнений и соответствующих граничных условий. Математическую модель силового взаимодействия элемента конструкции схематично представить в виде [2]:

$$L(u, \varepsilon, \sigma) = F(x, t) \quad (1)$$

при

$$\left. \begin{aligned} l_1(\sigma)|_{\Gamma_1} &= f_1(x, t); \\ l_2(u)|_{\Gamma_2} &= f_2(x, t); \\ l_3(u)|_{\Gamma_3} &\geq f_3(x, t); \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $L$  – дифференциальный оператор механики сплошной среды;  $F$  – вектор нагрузки;  $x, t$  – пространственные и временная координаты;  $l_1, l_2, l_3$  – операторы граничных условий на частях поверхности элемента;  $u, \sigma, \varepsilon$  – перемещения, напряжения и деформации;  $\Gamma_1$  – часть поверхности с заданными силовыми граничными условиями;  $\Gamma_2$  – часть поверхности с кинематическими граничными условиями;  $\Gamma_3$  – часть поверхности возможного контактного взаимодействия;  $f_1, f_2, f_3$  – векторы правых частей граничных условий: поверхностные нагрузки,

перемещения точек поверхности и первичные зазоры соответственно.

При известной левой части выражения (1) для разработки математической модели остается определить систему эксплуатационных нагрузок, действующих на конструктивный элемент, сформулировать граничные условия и определить соответствующие правые части в системе (2).

Построение расчетных схем является важным этапом разработки математических моделей элементов конструкций специализированных штампов. От правильного выбора расчетной схемы зависят численные значения рассчитываемых величин и, как следствие, достоверность определения характеристик прочности и жесткости всех элементов конструкции. При построении расчетных схем в каждом конкретном случае необходимо исходить из анализа конструктивных особенностей штампа и схемы взаимодействия его конструктивных элементов, определяющих характер, направление и величины действующих усилий. Действием факторов, несущественно влияющих на характер силового взаимодействия, целесообразно пренебречь, т. к. при этом расчетную схему можно значительно упростить при практически неизменной точности получаемых результатов.

Основная проблема в постановке задачи (1)-(2) состоит в том, что физически она представляет собой задачу исследования контактного взаимодействия в многокомпонентной механической системе, а математически – нелинейную начально-краевую задачу с заранее неизвестными зонами контакта и законами распределения контактных давлений. Если к тому же рассматривается процесс разделения листового материала, то получаемая задача анализа становится еще гораздо сложнее, что чрезвычайно затрудняет проведение многовариантных исследований в процессе параметрического анализа и синтеза штамповой оснастки. В связи с этим на первом этапе предлагается провести расчетно-экспериментальное определение контактных нагрузок на режущие элементы штампов, рассматривая первичное контактное взаимодействие пуансонов, матриц и пуансон-матриц до начала их глубокого внедрения в штампуемый материал.

**Расчетно-экспериментальная методика исследования напряженно-деформированного состояния и контактного взаимодействия элементов технологических систем листовой штамповки.** Основы расчетно-экспериментального метода

определения параметров расчетных моделей элементов сложных механических систем изложены в работах [27, 28]. Если через  $R$ ,  $E$ ,  $M$  и  $N$  обозначить реальный исследуемый объект, его экспериментальную, математическую и численную модели соответственно, то следуя [28], приходим к задаче определения параметров  $p_N^*$ , которые доставляют минимум функционалу невязки переменных состояния:

$$p_N^* = \arg \min I(u_N(p_N) - u_E(p_E)). \quad (3)$$

Здесь параметры  $p_R, p_E, p_M, p_N$  составляют обобщенное параметрическое пространство, точки которого определяют  $R$ ,  $E$ ,  $M$  и  $N$ , а соответствующие переменные состояния определяются путем решения множества задач:

$$\begin{cases} L_R(u_R, p_R, F_R, t) = 0; \\ L_R(u_E, p_E, F_E, t) = 0; \\ L_R(u_M, p_M, F_M, t) = 0; \\ L_R(u_N, p_N, F_N, t) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Операторы  $L_*$  являются проекциями оператора  $L$  в задаче (1) на соответствующие пространства.

Естественно, что соотношения (3)-(4) в том или ином случае претерпевают трансформацию к более конкретному виду при решении соответствующей задачи. В рассматриваемом случае в качестве компонент вектора искомых параметров расчетных моделей элементов разделительных штампов  $p_N^*$  можно рассмотреть зону контакта в сопряжении его режущих элементов со штампуемым материалом, а также закон распределения контактного давления в этих сопряжениях.

**Численное моделирование взаимодействия режущего инструмента с заготовкой.** Для расчетного исследования контактного взаимодействия режущих элементов штампов с листовым материалом можно привлечь метод конечных элементов [27], реализованный в том или ином программном пакете FEM. В данном случае для моделирования системы „пуансон – заготовка – матрица” (рис. 2) был привлечен

программный комплекс ANSYS. В качестве варьируемых параметров для описания геометрии тел вращения выступают все размеры пуансона, матрицы, заготовки, а также физико-механические характеристики материалов и параметры конечно-элементной сетки.

Путем варьирования размеров и расположения зон сгущения-разрежения можно добиться достаточно подробного моделирования НДС в исследуемой системе, а варьирование их размеров и формы дает

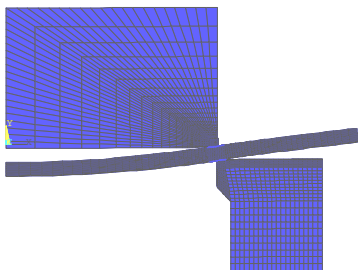


Рис. 2. Конечно-элементная модель системы „пуансон – заготовка – матрица”

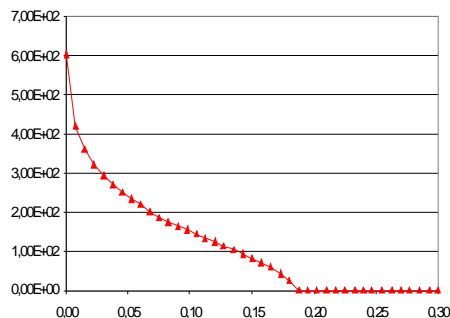


Рис. 3. Характерные распределения контактных давлений (МПа) по радиальной координате (мм)

возможность хватить достаточно широкий класс конструкций пуансонов и матриц, а также толщин и материалов заготовок.

В частности, в процессе многовариантных исследований при варьировании диаметра штампуемой детали, ее толщины и технологического зазора между пуансоном и матрицей удалось установить:

1) контакт режущего инструмента с заготовкой локализуется в зоне режущих кромок, при этом ширина контактного пояса составляет  $0,1 \div 0,5$  толщины штампуемого материала  $h$  (рис. 3);

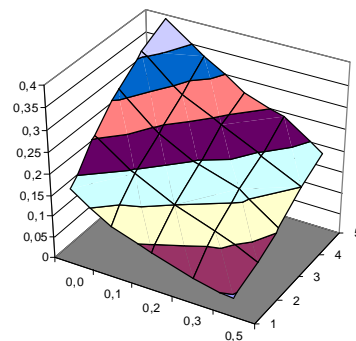
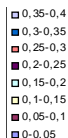


Рис. 4. Зависимость относительной ширины контакта от величины зазора для 5-ти толщин (мм)

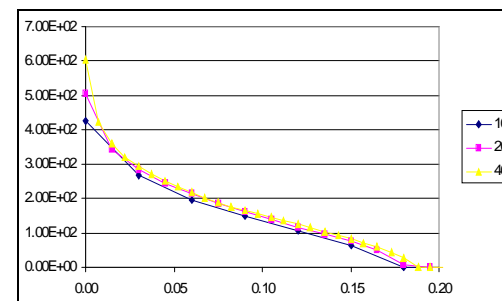
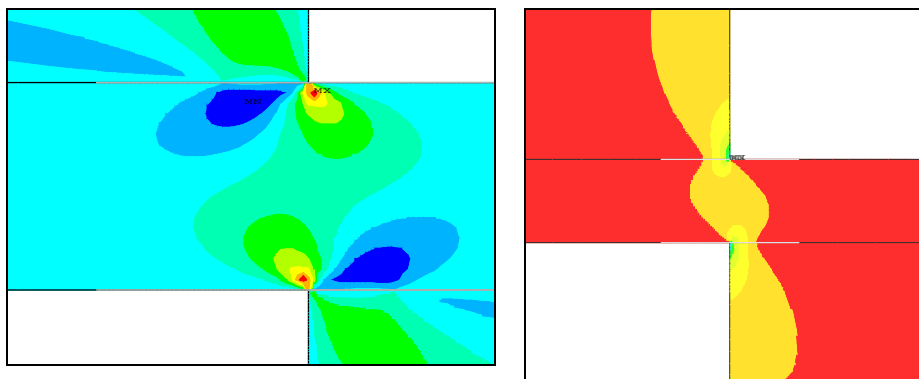


Рис. 5. Распределение контактных давлений при разной густоте сетки

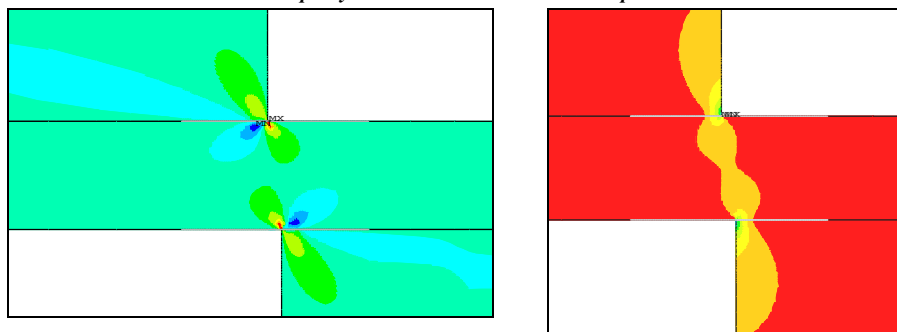
2) с ростом относительного технологического зазора  $\delta/h$  (см. рис. 2) контактные давления растут, а ширина контактного пояса уменьшается (рис. 4);

3) при сгущении конечно-элементной сетки в районе режущей кромки уровень максимальных напряжений на кромке растет (рис. 5).

На рис. 6 представлены некоторые картины распределения напряжений и перемещений в исследуемой системе взаимодействующих тел, иллюстрирующие характер напряженно-деформированного состояния, особенностью которого является локализация напряжений в зоне режущих кромок пуансона и матрицы, а также в области разделения штампуемого материала.



при нулевом технологическом зазоре



при технологическом зазоре 10% толщины штампуемого материала  
Характер распределения касательных напряжений в зоне кромок  
Характер распределения осевых напряжений в зоне кромок

Рис. 6. Картины распределения напряжений в исследуемой системе взаимодействующих тел

Таким образом, проиллюстрировано, что в процессе конечно-элементного моделирования можно установить качественные и количественные характеристики НДС в системе „режущий инструмент штампа – листовый материал”, следующие из анализа его численной модели  $N$ , созданной на основе математической модели  $M$ , содержащей систему уравнений теории упругости [29], условий контактного взаимодействия в виде условий непроникновения для взаимодействия гладких тел без трения [30, 31]. При этом требуется рассмотрение данной системы и на основе экспериментальных методов, что даст возможность

обосновать достоверность полученных численных результатов.

**Результаты экспериментальных исследований.** Для анализа адекватности используемых численных моделей привлекаются результаты экспериментальных исследований, описанные в [2]. В ходе экспериментальных исследований было проведено измерение ширины контактного пояса в сопряжении „пуансон – заготовка – матрица”, фиксация характера распределения усилий штамповки во времени, а также определение величины контактного давления в сопряжении пуансона и матрицы со штампуемым материалом.

Для определения технологических эксплуатационных параметров, являющихся исходными данными при формулировке граничных условий и определении внешних нагрузок на режущий инструмент РПШ, проведено исследование условий нагружения вырубных матриц и пуансонов в производственных условиях. При этом в процессе проведения исследования решалась задача о влиянии реологических характеристик штампуемого материала, габаритов и толщины вырубаемых деталей на ширину зоны контакта и на глубину внедрения режущих кромок инструмента в процессе штамповки до момента скола [2].

Для проведения исследования использован вырубной УПШ-М, в качестве штампуемого материала использование полосы из листовых сталей Ст.3 и X18H10T следующих толщин: 6, 8, 10 и 12 мм, в которых пробивались отверстия диаметра – 20, 40, 60 и 80 мм. Вырубка производилась без прижима заготовки и

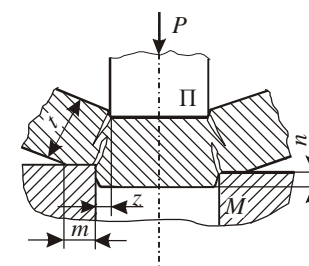


Рис. 7. Схема взаимодействия рабочих частей и материала в процессе вырубки [2]

одинаковом двустороннем относительном зазоре, равном 15% толщин листа. Постоянство относительного зазора для разных толщин листа достигалось сменой вырубных пуансонов.

В процессе штамповки пуансон  $\Pi$ , внедряясь в штампуемый металл, вынуждает его вдавливаясь в полость матрицы  $M$  (рис. 7). При этом своей режущей кромкой он вдавливается в заготовку и

оставляет на ней блестящий цилиндрический поясок определенной высоты. Концом своим он сминает плоскость штампуемой детали и оставляет на ней отпечаток в виде контактной зоны, обозначающей границы пластических деформаций.

Штампуемый материал при вырубке опирается о „зеркало” матрицы и также оставляет на своей поверхности отпечаток, распространяющийся от режущей кромки матрицы к периферии на величину  $m$ . Вдавливаясь в полость матрицы на глубину  $n_M$ , штампуемая деталь калибрует свои контуры о режущие кромки. При этом на боковой поверхности детали появляется блестящий цилиндрический поясок, характеризующий величину внедрения вырубаемой детали в матрицу до момента скола.

Для определения протяженности зон контакта заготовки с пуансоном  $m_{\Pi}$  и матрицей  $m_M$  и глубины внедрения соответствующих ведущих кромок  $n_{\Pi}$  и  $n_M$  до момента скола все отштампованные полосы и вырубленные изделия („пятаки”) были подвергнуты обмерам на инструментальном микроскопе. При этом измерялись следующие величины очага деформации: действительная толщина материала  $t$ , которая отличается от своего номинального значения, внедрение режущих кромок пуансона и матрицы и ширины зон контакта  $m_{\Pi}$  и  $m_M$ .

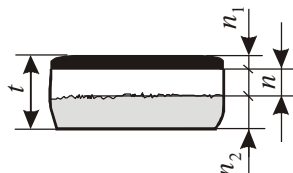


Рис.8. Геометрические параметры вырубленной детали [2]

При рассмотрении под микроскопом поверхности среза вырубленных деталей по высоте видны три зоны: искривление первоначальной плоскости листа  $n_1$  (рис. 8) вследствие изгиба и сжатия при вырубке (в окуляре – тень, темная полоса), блестящий поясок внедрения в штампуемый металл режущих кромок  $n$  и матовая поверхность скола  $n_2$  с возможными локальными расслоениями.

При проведении обмеров вырубленных деталей особое внимание уделялось измерению высоты блестящего пояса  $n$ , показанного на рис. 8. Измерение производилось посередине волнистой линии А-А, исключая резкие отрывы и затяжки. Кроме того, в силу практической невозможности соблюдения строгой равномерности зазора между режущими кромками пуансона и матрицы высота

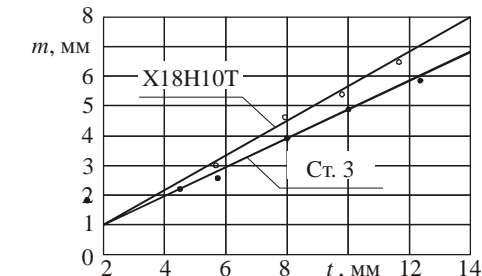


Рис.9. Зависимость ширины кольца контакта от толщины материала

блестящего пояса по окружности может несколько отличаться. Поэтому измерение данной высоты производилось в трех местах каждой детали под углом  $120^\circ$  и получали среднее значение. Измерения производились с точностью до 0,01 мм. Вырубка детали каждого диаметра по всем толщинам и маркам штампуемого материала дублировалась не менее трех раз.

После проведения измерений соответствующих величин на всех отштампованных деталях оказалось, что ширина контактной зоны заготовки с матрицей составляет для Ст.3 от 40 до 50%, а для стали Х18Н10Т от 45 до 55% толщины штампуемого материала (рис. 9). Как видно из графика, не только абсолютные значения ширины контактной зоны для стали Х18Н10Т, но и интенсивность их возрастает при увеличении толщины штампуемого материала несколько больше по сравнению со Ст.3.

В данных экспериментах величина относительного зазора между пуансоном и матрицей для сопоставимости результатов была выбрана постоянной, равной 15% для всех толщин штампуемого материала.

Для определения закона распределения усилий штамповки во

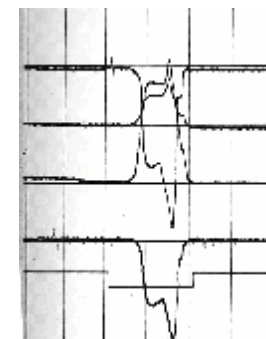


Рис. 10. Типовая



времени была проведена фиксация деформаций нижней плиты разделительного штампа при штамповке на механическом прессе 1430 усилием 1000 кН. Осциллограммы записаны на осциллографе Н041 по сигналам тензодатчиков, наклеенных на базовые плиты. Скорость протяжки ленты при записи составляла 16 см/сек, т.е. цена одного деления отметчика времени на осциллограмме (расстояние между вертикальными линиями) соответствует 0,1 сек. Одна из типовых осциллограмм процесса вырубki детали диаметром 40 мм из Ст.3 толщиной 1 мм показана на рис. 10. Из рассмотрения осциллограммы следует, что полная длительность импульса составляет 0,1 сек, а колебательные процессы в базовой плите сразу после окончания вырубki детали прекращаются, а точнее, вообще отсутствуют по причине наличия в данной диссипативной системе значительных восстановительных сил.

Представленная осциллограмма качественно является характерной типовой для процессов деформирования не только базовых плит, но и других элементов РПШ. В частности, при проведении различных экспериментов с использованием динамической электротензометрии тензодатчики наклеивались на многие конструктивные элементы: направляющие колонки, вырубные матрицы, пуансоны. Величиной амплитуда, безусловно, все полученные осциллограммы отличаются, но имеют одно общее свойство – импульс деформации, длящийся около 0,1 сек, затухает сразу после окончания процесса, как показано на рис. 10. Таким образом, по результатам экспериментов есть основание утверждать, что при проведении расчетов на прочность и жесткость основных деталей разделительных штампов статическая постановка задачи правомерна, т.е. при разработке математических моделей силового взаимодействия из дифференциальных уравнений процессов деформирования элементов время, как одну из переменных величин, входящих в уравнения, можно исключить.

Определение рациональной формы и размеров, проведение расчетов на прочность рабочего инструмента затруднены баз наличия картины распределения и величин контактных давлений,

действующих между инструментом и обрабатываемым материалом. Очевидно, характер распределения нормальных и касательных напряжений на поверхности матрицы будут такими же, как и на соответствующих участках контакта инструмента с заготовкой, поэтому исследование НДС инструмента следует начинать с изучения механики процесса разделительных операций. Необходима четкая картина распределения напряжений в заготовке и в зоне разделения по контактными поверхностям.

Экспериментальное исследование процесса вырубki проведено методами фотоупругости с лазерными и обычными поляризующими источниками освещения (рис. 11).

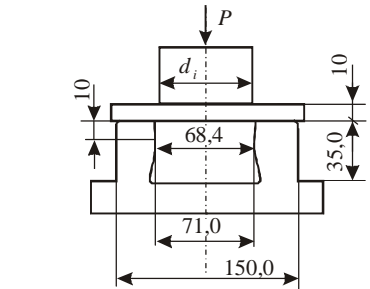


Рис. 11. Схема нагружения моделей штампующих заготовок

В результате проведения экспериментов были получены картины изодром, т.е. линий одинаковой абсолютной разности хода  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ , соответствующие двум ортогональным направлениям поляризации по оси X и Y. На рис. 12 показаны картины изодром [2], полученные на моделях при различных высотах и величинах относительного зазора.

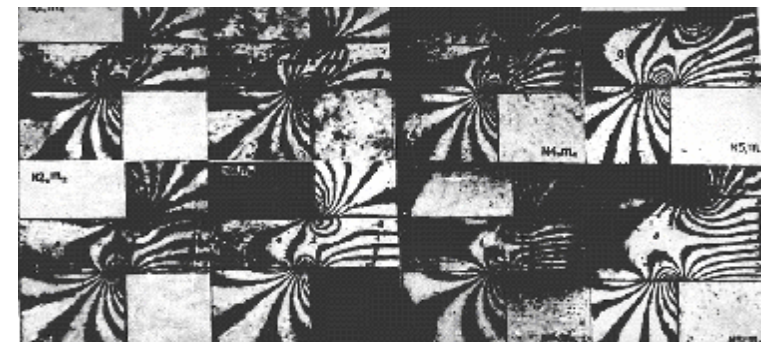


Рис. 12. Картины изодром, полученные на моделях при различных величинах относительного зазора:

N1:  $t = 5$  мм,  $z = 0\%$ ,  $P = 12$  кгс; N2:  $t = 5$  мм,  $z = 15\%$ ,  $P = 12$  кгс;  
N3:  $t = 5$  мм,  $z = 30\%$ ,  $P = 12$  кгс; N4:  $t = 10$  мм,  $z = 40\%$ ,  $P = 24$  кгс;  
N5:  $t = 15$  мм,  $z = 50\%$ ,  $P = 36$  кгс

Распределение напряжений по контактной поверхности режущего инструмента со штампуемой заготовкой имеет большой практический интерес, так как оно в значительной мере определяет расчетную схему и граничные условия при инженерных расчетах пуансонов и матриц на прочность. На рис.13 показано распределение главных напряжений в заготовке в непосредственной близости от контактной поверхности с матрицей. Здесь цифры соответствуют размерам моделей. Для наглядности на рис.14 значения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  отложены вверх, хотя в действительности они имеют отрицательный знак, т.е. это – напряжения сжатия.

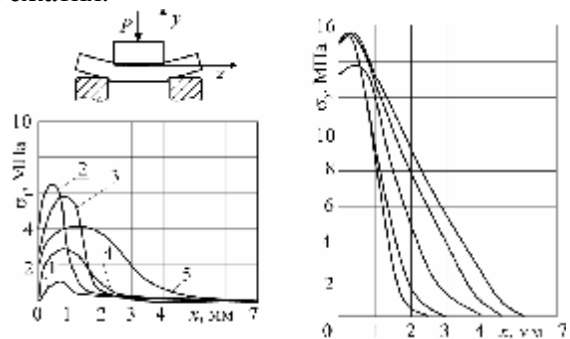


Рис.13. Распределение главных напряжений по контактной поверхности заготовки с матрицей

Из анализа графиков, приведенных на рис.13 следует, что максимальных значений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  достигают не на вершинах режущих кромок, а на некотором удалении от них. Для преобладающих  $\sigma_2$  величина этого удаления не превосходит 5% высоты модели и при повышении нагрузки эта величина будет уменьшаться.

Длина зоны контакта модели заготовки с матрицей во всех рассмотренных случаях соответствует примерно половине высоты модели, согласуется с величиной „пояска смятия”, полученной при реальной штамповке листового металла в разделительных штампах.

Как видно из графиков, закон распределения  $\sigma_2$  заготовки с зеркалом матрицы в строгой интерпретации имеет нелинейный

характер, однако с достаточной для практики точностью может быть описан линейной зависимостью типа  $y = ax + b$ .

Полученные в результате экспериментальных данные позволяют сделать выводы о том, что:

- ширина контактной площадки в сопряжении режущих элементов штампов со штампуемым материалом составляет около 50% его толщины;
- контактные давления по ширине пояска контакта увеличиваются по направлению к кромке, а закон их распределения можно примерно аппроксимировать линейной зависимостью;
- исследование напряженно-деформированного состояния штампов с достаточной для практики точностью можно проводить в квазистатической постановке.

**Вывод.** Сравнительный анализ картин напряженно-деформированного состояния, характерных зависимостей контактных площадок от конструктивных и технологических параметров, полученных численно и экспериментально, позволяет сделать следующие выводы.

1. Передача усилий штамповки между режущими частями штампов и штампуемым материалом происходит на относительно узких областях контакта шириной  $0,1 \div 0,5$  толщины штампуемого материала.

2. Вследствие недостаточной точности измерений контактных давлений экспериментальными методами, а также в связи с ростом максимальных давлений на режущей кромке (определенных численно), нельзя достаточно достоверно определить величину максимальных давлений на режущих кромках, хотя в остальной части контактной зоны их распределение можно считать примерно линейным по радиальной координате. Учитывая [32], что для такого рода условий контакта на кромках предсказывается особенность в распределении контактных давлений, требуется проведение дополнительных исследований контактных давлений с учетом шероховатостей реальных поверхностей сопряженных тел.

3. Для большинства случаев при моделировании

напряженно-деформированного состояния в сопряжении элементов разделительных штампов со штампуемым материалом можно применять квазистатическую постановку.

Описанная в статье технология расчетно-экспериментальных исследований получила только фрагментарную иллюстрацию на примере исследования распределения усилий в сопряжении элементов разделительных штампов и листовой заготовки. По ходу исследований некоторые численные результаты получили подтверждение, а относительно некоторых выяснилась необходимость проведения дополнительных исследований. С этой точки зрения предложенные подходы к решению задачи обоснования параметров расчетных моделей на основе сравнения результатов экспериментальных и численных исследований показали преимущество перед методами исследований, не сочетающие расчетные и экспериментальные этапы.

В дальнейшем планируется проведение исследований по уточнению распределений контактных давлений в зонах режущих кромок пуансонов, матриц и пуансон – матриц, а также создание специализированного программно-модельного комплекса для анализа напряженно-деформированного состояния элементов разделительных штампов и его интеграция с современными CAD/CAM/CAE-системами.

**Список литературы:** 1. Львов Г.И., Ткачук Н.А. Моделирование и анализ элементов технологических систем листовой штамповки // Механіка та машинобудування. – Харків: ХДПУ, 1997. – № 1. – С.34-39. 2. Заярненко Е.И. Разработка математических моделей и расчеты на прочность разделительных перенадеживаемых штампов. – Дисс. на соиск. уч. ст. докт. техн. наук. – Харьков. – 1992. – 418 с. 3. Мовшиович И. Я. Повышение стойкости режущих элементов штампов методом вакуумно-плазменного упрочнения / И. Я. Мовшиович, Б. В. Горелик // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2005. – № 6. – С.19-20, 29-32. 4. Мовшиович А.Я., Буденный М.М., Здор Г.В. Конструирование и изготовление оснастки для ударной импульсной штамповки // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Тем. зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2006. – С.480-486. 5. Заярненко Е.И., Ткачук А.В., Ткачук Н.А. Расчеты на прочность вырубных матриц и пуансон-матриц // Кузнечно-штамповочное производство. – 1990. – № 12. – С.18-21. 6. Popat P.B., Ghosh A., Kishore N.N. Finite -element analysis of the blanking process // Journal of Mechanical Working Technology. – Amsterdam. – 1989. – 18, № 3. – PP.269-282. 7. Лисин А.Г. Исследование влияния некоторых факторов на деформацию заготовки по пояску смятия при вырубке-пробивке // Кузнечно-штамповочное производство. 1970. – № 6. – С.19-21. 8. Михаленко Ф.П., Гулиев А.И. Закономерности распределения интенсивности напряжений и деформаций по пояску смятия при вырубке-пробивке // Кузнечно-штамповочное производство, 1989. – № 12. – С.17-19. 9. Смолянинов В.П., Камышов И.Я. К расчету нагрузок на режущие кромки рабочих частей

штампов для чистовой вырубки // Вестник Харьковского политех. института. – Харьков, 1985. – № 225. – С.56-58. 10. Скворцов Г.Д. Основы конструирования штампов для холодной листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1972. – 360 с. 11. Евстратов В.А., Кравцов В.Я., Финкель П.Е. Исследование напряженного состояния и оптимизация конструкций обойм матриц для выдавливания // Вестн. Харьк. политех. ин-та. – 1987. – № 250. – С.5-7. 12. Кальнер З.Д., Овчинников А.Г., Симбирский А.А. Напряженное состояние матриц для холодной объемной штамповки. ПО „ЗИЛ“, МВТУ им. Н.Э.Баумана // Металловед. и терм. обраб. мет. – 1984. – № 7. – С.47-49. 13. Хмара С.М., Смолянинов В.П., Коломойцев А.А. О причинах выкрашивания твердосплавных вырезных матриц // Кузнечно-штамповочное производство. – 1965. – № 8. – С.21-23. 14. Хмара С.М., Смолянинов В.П., Коломойцев А.А., Рудь В.И. К определению напряжений на режущих кромках вырезных твердосплавных матриц // Кузнечно-штамповочное производство. – 1966. – № 6. – С.22-24. 15. Казаков Ю.П. Способ определения коэффициента трения при пластическом течении листовых металлов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1972. – № 9. – С.20-21. 16. Богоявленский К.Н., Кирсанов Б.А., Мочалов С.М., Елкин Н.М. Экспериментальное исследование контактных напряжений в матрице при торцевой раскатке // Кузнечно-штамповочное производство. – 1983. – № 4. – С.25-26. 17. Тимощенко В.А., Брухис М.М. Исследование влияния шероховатости поверхности контактной зоны разделительных штампов на их износостойкость // Вестник машиностроения. – 1988. – № 3. – С.44-47. 18. Вайнтрауб Д.А. О влиянии зазора на стойкость разделительных штампов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1968. – № 6. – С.22-23. 19. Романовский В.П., Мовшиович И.Я., Долгов В.А. Исследование стойкости режущих элементов универсально-сборных штампов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – № 6. – С.16-19. 20. Залесский В.И., Михаленко Ф.П., Губарев В.В. Применение новой стали для вырубных штампов с целью повышения их стойкости // Кузнечно-штамповочное производство. – 1961. – № 3. – С.9-15. 21. Шраер Э.А. Экспериментальное исследование прочности твердосплавных вырубных матриц // Кузнечно-штамповочное производство. – 1969. – № 10. – С.19-22. 22. Михаленко Ф.П., Дурандин М.М. Влияние быстроходности прессы на износ режущих кромок при вырубке-пробивке пружинной стали // Вестник машиностроения. – 1968. – № 5. – С.59-62. 23. Воронцов В.К., Полухин П.И., Белевитин В.А., Бинза В.В. Экспериментальные методы механики деформируемых твердых тел: технологические задачи обработки давлением. – М.: Металлургия, 1990. – 480 с. 24. Фурсов А.Н., Кирдеев Ю.П., Новиков С.А., Грузин И.И. Применение метода голографической интерферометрии для исследования вибраций станин тяжелых штамповочных молотов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – № 3. – С.29-30. 25. Капустин А.А. Количественная оценка голографических интерферограмм с помощью спекл-интерферометрии в прочностных исследованиях. – В кн.: Оптико-когерентные информационно-измерительные системы. – Харьков: ХАИ. – 1977. – С.149-154. 26. Артюхов В.П., Савченко В.И. Исследование распределения напряжений в элементах вырубных штампов методом фотоупругости // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – № 11. – С.24-26. 27. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с. 28. Ткачук Н.А. Методы исследования прочностных и жесткостных характеристик элементов технологических систем. В сб.: Динамика и прочность машин: ХГПУ. –1997. – Вып.55. – С.194-204. 29. Лурье А.И. Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 940 с. 30. Кравчук А.С. К задаче Герца для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров // Прикл. мат. и мех. – 1977. –Т.41.– Вып.2. – С.329–337. 31. Кравчук А.С. Постановка задачи о контакте нескольких деформируемых тел как задачи нелинейного программирования // Прикл. мат. и мех. – 1978. –Т.42.– Вып.3. – С.466–474. 32. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 510 с.

Поступила в редколлегию 10.04.08